

# 공공장소 호흡기 감염 예방을 위한 다중센서 기반 협력적 환기 시스템

나보림\* 전혜림\* 홍현선\* 홍신†

한동대학교 전산전자공학부

## Multi-sensor-based Collaborative Ventilation System for Preventing Respiratory Infections in Public Spaces

Borim Na\*, Hyerim Jun\*, Hyunsun Hong\*, Shin Hong†

School of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University

### 요약

본 논문은 호흡기 감염병 확산 방지를 위해 공용 공간의 여러 사용자의 환기를 유도하는 다중센서 기반 환기 정보 시스템을 소개한다. 온습도 센서와 CO<sub>2</sub> 센서를 활용하였으며, 센서 값을 기반으로 머신러닝 모델을 학습시켜 공용 공간의 환기 여부를 파악하여 사용자에게 환기 정보 알림을 제공하도록 하였다. 이 시스템은 센서의 수와 배치를 자유롭게 선택할 수 있어 어떤 종류의 공용 공간에서든 적용이 가능하다. 제안한 시스템을 구현하여 적용한 결과, 온습도 및 CO<sub>2</sub> 센서를 통해 수신한 센서 값을 바탕으로 환기 여부를 효과적으로 인지할 수 있으며, 이를 통해 협력적 환기 서비스를 구현할 수 있음을 확인하였다.

### 1. 서론

COVID-19 팬데믹을 겪으며 호흡기 감염병을 막을 수 있는 환기의 중요성이 커지고 있다. 환기와 호흡기 감염병 확산의 연관성에 관한 연구결과들[1]을 바탕으로 정부는 호흡기 감염병의 확산을 방지하기 위해 실내 환기에 대한 지침을 지속해서 내놓고 있다.

관리 주체가 명확한 공간(예: 개인 공간)의 경우와 달리, 별도의 관리인이 지정되어 있지 않은 공용 공간에서는 환기 여부를 관리하는 데 어려움이 있다. 정부 지침에 맞게 주기적으로 공용 공간을 환기하기 위해서는 그 공간을 사용하는 사람들의 지속적인 협력이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 협력을 이끌어 내기 위한 환기 알림 IoT 시스템을 제안한다. 이 시스템은 공용공간에서 불특정 다수의 프라이버시를 침해할 수 있는 카메라 센서 대신 온도, 습도, CO<sub>2</sub> 센서를 사용하여 환기 여부를 파악했다. 또한, 다양한 공간에서 유동적으로 설치할 수 있도록 하기 위해 노드의 개수와 설치하는 위치를 관리자가 자유롭게 정할 수 있도록 했다. 온도, 습도, CO<sub>2</sub> 농도 값을 이용하여 해당 공간에 환기 여부를 모니터링하고, 환기가 필요하다고 판단될 시 사용자에게 웹을 통해 환기 필요 알림을 보내는 서비스를 구성했다. 구상한 시스템을 실제로 구현하여 공용공간에서 적용한 사례 연구 결과, 제안한 방법을 통해 실내 환기 여부를 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 서비스의 모든 코드는 아래의 저장소에서 확인할 수 있다.

<https://github.com/HyunsunHong/Ventilation-Monitoring-IoT-System>

### 2. 협력적 환기 시스템

#### 2.1. 시스템의 구성

\* 세 저자는 본 논문에 동일한 정도로 기여함(equally contributed).

† hongshin@handong.edu

§ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 소프트웨어중심대학 사업(한동대)의 지원을 받아 수행되었음.

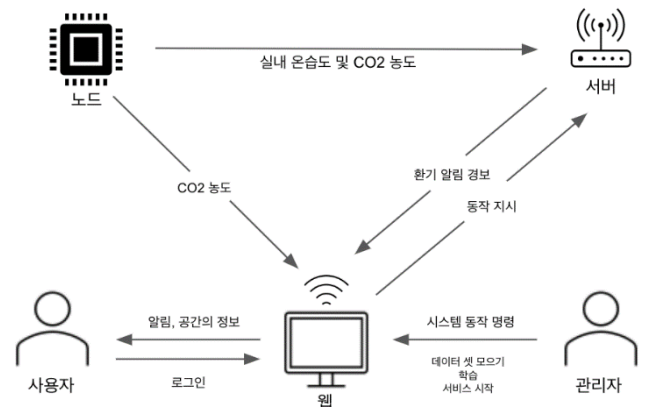


그림 1. 협력적 환기 시스템의 구성

제안하는 협력적 환기 시스템은 도서관, 강의실과 같이 불특정 다수의 사람들이 밀폐된 공간을 공유하는 상황에서, 해당 공간의 사용하는 누군가가 주기적으로 환기 작업을 수행할 수 있도록 알림을 제공하는 것을 목표로 한다. 그림 1은 제안한 시스템의 요소와 사용자 간의 사용 사례를 설명한다. 본 시스템은 (1) 공간의 공기 정보를 파악하는 센서 노드, (2) 공간의 환기 여부를 판단하는 센서 서버, (3) 사용자에게 공간의 정보를 제공하는 웹 서버로 구성되며, 각 요소의 구체적인 동작은 다음과 같다:

- **센서 노드:** 센서 노드는 설치된 공간의 온도, 습도, CO<sub>2</sub> 농도를 측정하는 센서 장치이다. 온습도 센서, CO<sub>2</sub> 센서를 이용하여 프라이버시를 침해하지 않고 공기의 상태를 파악할 수 있도록 하였다. 또한 사용자가 설치할 노드의 개수와 위치에 제한을 두지 않음으로써 다양한 공간에 환기 모니터링 서비스를 적용할 수 있도록 했다.

- **센서 서버:** 서버는 담당 공간에 설치된 모든 노드들로부터 온습도 및 CO<sub>2</sub> 값을 받아, 전체 공간의 환기 여부를 판단하는 역할을 하는 장치이다. 서버는 노드들로부터 각 위치의 온습도 및 CO<sub>2</sub> 농도 값을 받아 데이터 셋을 수집한다. 이 데이터 셋을 통해 머신러닝 모델 학습, 머신러닝을 통한 실내 환기 여부 추

론을 진행한다. 또한, 센서 서버는 모든 노드들로부터 받은 센서 정보를 통해 공용 공간의 환기 여부를 실시간으로 판단한다. 서버가 해당 공용공간이 환기가 되고 있지 않다고 판단하면 서버는 웹에 환기가 필요하다는 정보를 송신한다.

- 웹 서버: 웹 서버 사용자에게 공간의 정보를 제공하고 노드와 서버를 사용할 수 있도록 해주는 유저 인터페이스를 제공한다. 환기가 필요할 때마다 환기 필요 알림을 웹 구독자들에게 실시간으로 알려준다. 사용자는 웹 사이트를 구독한 후 환기 필요 알림을 웹 브라우저(예: Chrome) 팝업 알림을 통해 받을 수 있다.

제안한 시스템은 (1) 관리자(administrator)와 (2) 사용자(end-user)에 의하여 운영되며, 각각의 역할은 다음과 같다:

- 관리자는 협력적 환기 시스템의 요소들을 해당 공용공간에 설치한다. 관리자는 관리하는 공간의 크기, 환기시설의 위치 등 해당 공간의 특성을 반영하여 센서 노드의 개수와 배치를 구상한 후 센서 노드들을 해당 공간에 설치해야 한다. 그리고 센서 서버를 설치한 후 각 센서 노드에 센서 서버에 할당된 고유 번호를 입력하여 연결시킨다. 그 후, 관리자는 환기 여부 판단 분류기를 학습시키기 위한 데이터 셋을 모으고 그 데이터 셋을 이용해 분류기를 학습시켜야 한다. 시스템 설정을 완료하면, 관리자는 공용공간의 환기 정보 알림 서비스를 받을 수 있는 웹페이지 주소와 해당 공용공간에 할당된 아이디와 비밀번호를 공용공간을 사용하는 모든 사용자들에게 공유한다.
- 사용자는 해당 웹페이지를 통해 환기 정보 알림, 공용공간의 실시간 환기 여부 판단 정보와 CO<sub>2</sub> 농도 값을 확인할 수 있으며 이러한 정보를 바탕으로 사용자들이 협력적으로 환기를 하도록 유도할 수 있다.

## 2.2. 다중센서 정보를 통한 환기 이벤트 인식

본 연구에서는 특정 장소에 특화된 환기 시스템이 아니라, 임의의 장소에 여러 대의 일반적인 센서 노드를 설치한 후 기계학습 방법을 통해 해당 장소의 상황 정보를 학습함으로써 다양한 장소에 적응적으로 설치할 수 있는 환기 시스템을 설계했다.

문 열림 이벤트는 환기 시스템의 구동에 중심이 되는 정보다. 보통의 경우, 문 열림 이벤트는 문의 기계적 동작을 직접적으로 감지함으로써 쉽게 탐지할 수 있으나, 본 연구의 대상인 공공장소의 경우, 환기에 활용할 수 있는 문과 창문의 개수가 많으며, 이들에 대해 센서를 설치하기가 어렵다는 한계가 있다. 제안하는 기법은 문 열림 이벤트를 간접적으로 탐지하기 위해, 적용 공간에서 문 열림 이벤트가 발생할 때 온습도 및 CO<sub>2</sub> 센서 값에 나타나는 특징적인 패턴을 학습하는 방법을 제안한다.

다중센서 값에서 피쳐(feature)로 활용한 값의 구성은 각 노드의 온습도 및 CO<sub>2</sub> 센서 값의 시계열 데이터로 이루어져 있다. 시계열 데이터는 서버의 등록된 노드의 순서대로 60초, 45초, 30초, 15초 전의 각 센서 값과 15초 직전의 센서 값의 차이의 절대값 60초, 45초, 30초, 15초 전의 센서 값과 현재 센서 값과의 차이 값의 절대값들로 구성되어 있다.

학습시켜야 하는 이벤트의 수는 외기 유입 통로의 수에 따라 설치한 노드의 개수에 의해 정해진다. 각 통로마다 노드를 설치했다는 가정 하에  $n$ 개의 통로가 있다고 한다면 발생할 수 있는

이벤트는 총  $2^n$ 개이다. 따라서 정확한 환기 판단을 위해서 머신러닝 모델을 만들 때 개의 이벤트에 대한 각각의 데이터를 모아서 분류기에 넣어주어야 한다.

분류기 랜덤 포레스트 모델을 사용하였는데, scikit-learn 라이브러리가 제공하는 RandomForestClassifier 모듈을 이용했다. 모델의 하이퍼파라미터는 해당 라이브러리의 디폴트 값[5]을 이용했다.

관리자는 데이터 셋을 수집하고 수집한 데이터 셋을 이용하여 분류기를 학습시켜야 한다. 데이터 셋을 수집하는 것과 분류기를 학습시키는 위해서는 관리자가 웹 페이지를 통해 서버에게 데이터 셋 수집과 학습명령을 내려야 한다. 데이터 셋은 앞서 언급한 피쳐와 환기여부에 대한 바이너리 레이블 값으로 구성되어 있다. 관리자는 수집할 데이터 셋의 레이블(환기여부)에 따라 공용 공간을 조성한 후, 웹을 통해 데이터셋 수집 명령을 내려, 서버가 3분동안 데이터 셋을 모으도록 한다. 관리자가 데이터 셋이 충분히 모였다고 판단 시, 웹을 통해 분류기 모델의 학습 지시를 내리며, 학습 완료 후 관리자는 웹을 통해 해당 분류기의 정확도를 알 수 있다.

## 3. 사례 연구

### 3.1. 시스템 구현

제안한 시스템의 실효성을 평가하기 위한 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구를 위해, 제안한 시스템의 센서노드를 Raspberry PI 3 Model B+에 온습도 센서 DHT-11 및 CO<sub>2</sub> 센서 CM1106로 구성했다. 센서 노드와 센서 서버 간의 통신은 MQTT로 구현하였다. 센서 노드는 현재의 온도, 습도, CO<sub>2</sub> 농도 값을 15초 간격으로 센서 서버에 전송한다. 센서 서버는 각 노드들로부터 온도, 습도 및 CO<sub>2</sub> 농도 값을 MQTT를 이용하여 받고 시계열 데이터를 만든다. 시계열 데이터는 1분 동안 15초 간격으로 수집한 데이터 값의 차이 값과 현재의 데이터 값과 60초 동안 15초 간격으로 수집한 데이터 값의 차이 값으로, 각 노드의 온도, 습도, CO<sub>2</sub> 농도 값을 60초 동안 저장하여 사용했다.

환기 여부를 판단하는 머신러닝 모델은 scikit-learn[5]의 RandomForestClassifier 모델을 사용했다. 현재 담당 구역이 환기가 필요하다고 판단되면, 센서 서버는 환기 필요 알림을 MQTT를 통해 웹 서버로 전송한다. 웹 서버는 로그인 한 사용자의 정보를 데이터베이스에서 받아온다. 해당 정보를 기반으로 서비스가 동작할 수 있도록 MQTT를 이용하여 서버에 명령을 준다. 서버로부터 수신된 환기 필요 알림은 웹 푸시 서비스를 이용하여 구독자들에게 정보를 제공한다. 웹 서버는 PHP, html, javascript, css를 이용해 5427 LoC로 구현하였다.

### 3.2. 실험 구성

구현한 환기 시스템을 총 2개의 문(출입문과 창문)이 있는 24.5 m<sup>2</sup> 면적의 공간에 적용하는 사례 연구를 수행했다. 실험 공간에서 공기의 흐름이 비교적 잘 통하는 공간이 문 앞과 창문 앞이었기 때문에 노드 2개를 각각의 공간에 1개씩 배치하였다.

이때, 레이블은 환기 여부 값(0이면 닫힘, 1이면 열림)이다. 본 실험에서는 ‘닫힘 - 열림(문) - 닫힘 - 열림(창문) - 닫힘 - 열림(문, 창문)’를 한 사이클로 하여 12 사이클 동안 661개의 데이터 셋을 수집하였다. 모델을 학습시킨 결과, Accuracy는 84.09%, Precision은 78.57%, Recall은 83.02%, F1-score은 0.81로 Accuracy와 F1-score값 모두 준수한 성능을 보여주었다.

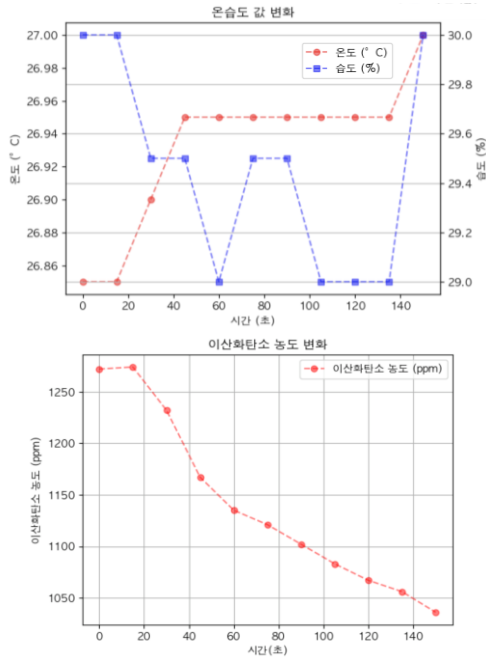


그림 2. 시나리오 1 실험에서 온습도 및 CO<sub>2</sub> 농도 변화

### 3.3 실험 결과

본 사례 연구에서는 제안한 협력적 환기 시스템의 운영의 가장 결정적인 기능인 문 열림 이벤트 탐지를 제안한 기계 학습 방식을 통해 온습도 및 CO<sub>2</sub> 값의 패턴 인식을 통해 얼마나 정확히 달성할 수 있는지를 평가하였다.

시나리오 1(그림 2)은 노드가 설치된 문 하나만 연 경우로 15초에서 환기를 시작하였으며 90초에 환기를 종료하였다. 그 결과, CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 습도의 변화폭이 완만하며 문 열림 판단 시간까지 약 75초 정도의 오차를 가지는 것을 확인했으며 문 열림을 정확히 판단하였다.

시나리오 2(그림 3)는 노드가 설치된 창문 하나만을 연 경우로 45초에서 환기를 시작하였으며 135초에 환기를 종료하였다. 시나리오 1과 비교하였을 때, CO<sub>2</sub> 농도, 온도, 습도의 변화폭이 가파르며 문 열림 판단까지 약 30초의 오차를 가지는 것을 확인했다. 이를 통해 시나리오 1에 비해 비교적 오차 시간이 짧으며, 문 열림을 정확히 판단한다는 것을 확인할 수 있었다.

위와 같은 시나리오별 4번의 실험을 진행한 결과, 실제 환기를 시작한 후 평균 50초 이내에 환기 추론 결과가 열림으로 판단된 것을 확인할 수 있었으며 이와 동일하게 환기를 종료한 후 환기 추론 결과가 닫힘으로 판단되어 환기 여부를 정확하게 추론하였다는 결과를 확인할 수 있었다. 위와 같은 환기 판단 오차 시간에 대해서는 이벤트가 시작되고 1분간의 변화량 단위로 데이터를 모으기 때문에 60초 전후의 오차는 발생할 수 있다고 판단하였다.

### 5. 관련 연구

환기와 관련된 연구는 공기질에 대한 관심도가 증가하면서 점차 많아졌다. 본 논문은 주 내용인 환기 측정과 관련된 연구로는 환기방식별 실내 환기 효율 분석[2], 환기 시스템의 국소적 환기 효율 분석[3], 기계 환기 시스템의 실내 환기 성능 특성 해석에

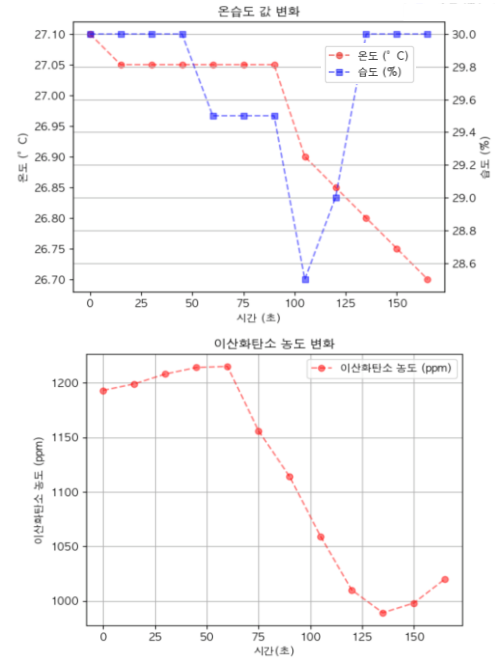


그림 3. 시나리오 2 실험에서 온습도 및 CO<sub>2</sub> 농도 변화

관한 연구[4] 등이 존재한다.

이와 같은 선행연구들과 본 연구와의 공통점은 환기를 측정하고 분석한다는 것과 분석을 위한 값으로 모두 CO<sub>2</sub> 농도 값을 사용한다는 점이다. 본 연구와의 차이점으로는 다른 연구들은 환기가 이미 되고 있다는 것을 전제에 두고 환기의 효율성과 성능을 측정하는 반면, 본 연구는 CO<sub>2</sub> 센서뿐만 아니라 온습도 센서를 이용하여, 사람의 판단에 따른 판단이 아니라, 머신러닝 모델을 통해 적용상황에 맞는 이벤트 조건을 자동으로 추정하는 방법을 제시하였다.

### 6. 결론

본 논문에서는 호흡기 감염병 전파 예방을 위한 IoT 시스템을 제안한다. 시스템은 온습도 센서와 CO<sub>2</sub> 센서를 이용하여 공용 공간의 공기 상태를 측정하고, 머신러닝 모델을 통해 환기여부 파악한다. 센서의 수와 배치는 자유롭게 선택할 수 있어서 어떤 종류의 공공시설에 대해서도 적용 가능하도록 설계하였다.

향후 연구로는 환기 판단 정확도를 높이기 위해, 센서 개수, 배치 및 시계열 데이터의 구성을 다양한 방식 설정하여 IoT 시스템의 환기 판단 정확도를 높이는 실험 연구를 수행할 계획이다.

### 참조문헌

- [1] Parhizkar, H., et al. (2022). Quantifying Environmental Mitigation of Aerosol Viral Load in a Controlled Chamber With Participants Diagnosed With Coronavirus Disease 2019. *Clinical Infectious Diseases*, 75(1), e174-e184. <https://doi.org/10.1093/cid/ciac006>
- [2] Kang, T. (2006). An Experimental Analysis of Ventilation Effectiveness using Tracer Gas. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 30(2), 260-266.
- [3] Choi, Y., & Song, D. (2017). Analysis of the Local Air-Change Effectiveness by Field Measurement. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 29(2), 63-67.
- [4] Koo, J. (2012). A Study on Characteristic Analysis for Indoor Ventilation Performance of Mechanical Ventilation System. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 16(2), 31-37.
- [5] Scikit-learn: machine learning in Python, <https://scikit-learn.org>